

УДК 539.3

ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВЫСОТНОГО СООРУЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Ш.О. Худайназаров

*Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства,
г. Ташкент (Узбекистан)*

Аннотация. Проведены исследования с целью анализа поведения высотного сооружения на различные кинематические воздействия с учетом нелинейных и вязкоупругих свойства материала. Разработан обобщенный подход для динамического расчета высотных сооружений и построены амплитудно-частотные характеристики сооружений для различных точек сооружения. Исследование динамического поведения высотного сооружения при учете различных по природе нелинейных и диссипативных свойств материала показывает, что совместный учет всех этих свойств приближает получаемую картину к наблюдаемой действительности. Здесь амплитуда колебаний сооружения не бесконечно растет, а с течением времени постепенно снижается и максимально возможный учет нелинейных и диссипативных свойств материала приводит к скорейшему затуханию колебаний.

Ключевые слова: расчетная модель, виброизоляция, частота колебаний, амплитуда колебаний, нелинейность, диссипативные свойства материала, амплитудно-частотные характеристики.

Ссылка для цитирования: Худайназаров Ш.О. Динамический расчет высотного сооружения с учетом нелинейных вязкоупругих свойств материала при различных кинематических воздействиях // Инженерные исследования. 2022. №5 (10). С. 12-17. EDN: GLDLMF

DYNAMIC CALCULATION OF A HIGH-RISE STRUCTURE TAKING INTO ACCOUNT NONLINEAR VISCOELASTIC PROPERTIES OF THE MATERIAL UNDER VARIOUS KINEMATIC INFLUENCES

Sh.O. Khudainazarov

Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Tashkent (Uzbekistan)

Abstract. Studies have been carried out to analyze the behavior of a high-rise structure on various kinematic effects, taking into account the nonlinear and viscoelastic properties of the material. A generalized approach has been developed for the dynamic calculation of high-rise structures and the amplitude-frequency characteristics of structures for various points of the structure have been constructed. The study of the dynamic behavior of a high-rise structure, taking into account the non-linear and dissipative properties of the material, which are different in nature, shows that the joint consideration of all these properties brings the resulting picture closer to the observed reality. Here, the vibration amplitude of the structure does not increase infinitely, but gradually decreases with time, and the maximum possible consideration of the nonlinear and dissipative properties of the material leads to the fastest damping of the vibrations.

Keywords: calculation model, vibration isolation, oscillation frequency, oscillation amplitude, non-linearity, dissipative properties of the material, amplitude-frequency characteristics.

For citation: Khudainazarov Sh.O. Dynamic calculation of a high-rise structure taking into account nonlinear viscoelastic properties of the material under various kinematic influences // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.5 (10). Pp. 12-17. EDN: GLDLMF

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование и строительство высотных сооружений требует обеспечения их надежной эксплуатации при различных динамических воздействиях. Это, в свою очередь, диктует условия ограничения и уменьшения уровня колебаний конструкций от вредного динамического воздействия. К настоящему времени известны различные методы и средства борьбы с недопустимыми колебаниями конструкций, например, изменение жесткостных параметров конструкций, повышение демпфирующих свойств путем использования материалов и конструкций с высокой поглощающей способностью, применение виброизоляции и разнообразных гасителей колебаний.

В практикуемых строительных нормах динамическая расчетная модель осесимметричных сооружений (высотные трубы, градирни и пр.) принимается в виде упругой консоли с распределенной или сосредоточенной массой, что не позволяет учитывать ряд факторов - реальную геометрию, конструктивные особенности, пространственный характер работы сооружения, диссипативные свойства материала сооружения и другие, непосредственно влияющие на искомые значения динамических характеристик и напряженно-деформированное состояние (НДС) сооружений при различных воздействиях. В результате этого найденные значения искомых величин будут заметно отличаться от действительных.

Исследования собственных колебаний высотных осесимметричных сооружений (дымовых труб) показали, что несмотря на имеющиеся различия в характере высших форм колебаний рассматриваемых сооружений, основные (изгибные, продольные и крутильные) формы и соответствующие им частоты собственных колебаний не зависят от размерности выбранной расчетной модели. Поэтому исследования динамического поведения сооружения в неустановившемся режиме с учетом упругого, вязкоупругого и нелинейного деформирования материала можно провести в рамках одномерной модели. Простота расчетной модели позволяет детально изучить влияние различных законов изменения воздействия и различных законов деформирования материала на динамическое поведение сооружений.

Практика современного строительства в сейсмических районах требует исследования динамического поведения конструкций и совершенствования методики их расчета с учетом не только геометрических особенностей конструкций, но также с учетом нелинейных и диссипативных свойств материала сооружения. Практические способы расчета базируются обычно на динамическом анализе сооружений как линейно упругих систем. Однако инструментальные данные и результаты инженерного анализа о характере работы сооружений при сильных землетрясениях указывают на то, что жесткость сооружений не всегда остается постоянной. Поэтому параметры действительной реакции сооружений необходимо определять только с помощью нелинейного анализа, позволяющего разработать более обоснованные методы проектирования и строительства.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В этой статье рассматриваются вынужденные колебания высотных сооружений (рис.1) с кольцевым поперечным сечением $F(z)$ и кусочнопостоянным наклоном образующих. Материал сооружения обладает нелинейными и диссипативными свойствами.

Здесь представлен общий случай, когда учитываются и нелинейные и вязкоупругие свойства материала. В этом случае используются разработанная нами постановка [4-8] и это не допускает каких-либо упрощений в правой части разрешающей системы нелинейных интегро-дифференциальных уравнений.

Уравнение имеет вид (1):

$$[M]\{\ddot{w}(t)\}+[K]\{w(t)\}=\{P(t)\}+\int_0^t R_1(t-\tau)[K]\{w\}d\tau+EJ_1\gamma\{V(t)\}-EJ_1\gamma\int_0^t R_2(t-\tau)d\tau\{V(t)\} \quad (1)$$

с однородными начальными условиями:

$$u(z,0)=0, \quad \frac{\partial u(z,0)}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

Задача заключается в определении перемещений точек сооружения в различные моменты времени. Нелинейная система интегро-дифференциальных уравнений (1) с начальными условиями (2) решается методом Ньюмарка.

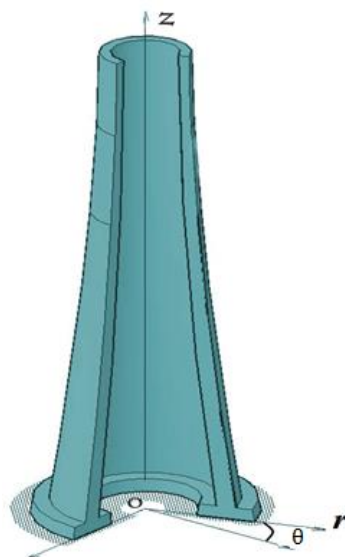


Рис.1. Модель высотного сооружения
Fig.1. High-rise building model

Уравнение (1) при задаваемых начальных условиях (2) решается методом прямого интегрирования с помощью численной пошаговой процедуры. Нами для решения системы уравнений (1) использовался метод Ньюмарка [9-10], основанный на независимых разложениях $w(t_i + \tau)$ и ее производной в ряды по степеням τ , при удержании членов, содержащих третью производную w_i . Коэффициенты при остаточных членах α и β выбираются из условия обеспечения безусловной сходимости процесса интегрирования:

$$w(t_i + \tau) = w_i + \tau \dot{w}_i + \frac{\tau^2}{2} \ddot{w}_i + \alpha \tau^3 \dddot{w}_i$$

$$\dot{w}(t_i + \tau) = \dot{w}_i + \tau \ddot{w}_i + \beta \tau^2 \dddot{w}_i \quad (3)$$

Заменяя $\ddot{w}_i = \frac{\ddot{w}_{i+1} - \ddot{w}_i}{\tau}$, запишем выражения для перемещений и скоростей (3) в виде:

$$w_{i+1} = w_i + \tau \dot{w}_i + \frac{\tau^2}{2} \ddot{w}_i + \alpha \tau^3 (\ddot{w}_{i+1} - \ddot{w}_i) \quad (4)$$

$$\dot{w}_{i+1} = \dot{w}_i + \tau \ddot{w}_i + \beta \tau^2 (\ddot{w}_{i+1} - \ddot{w}_i) \quad (5)$$

Тогда полученное из (4) ускорение (6):

$$\ddot{w}_{i+1} = \frac{1}{\alpha \tau^2} (w_{i+1} - w_i) - \frac{1}{\alpha \tau} \dot{w}_i + \left(1 - \frac{1}{2\alpha}\right) \ddot{w}_i \quad (6)$$

подставим в выражение для скорости (5):

$$\dot{w}_{i+1} = \frac{\beta}{\alpha \tau} (w_{i+1} - w_i) + \left(1 - \frac{\beta}{\alpha}\right) \dot{w}_i + \frac{\tau}{2} \left(2 - \frac{\beta}{\alpha}\right) \ddot{w}_i \quad (7)$$

Для отыскания решения w_{i+1} для момента времени t_{i+1} общее уравнение движения запишется в следующем виде:

$$[M] \ddot{w}_{i+1} + [C] \dot{w}_{i+1} + [K] w_{i+1} = \{P_{i+1}\} \quad (8)$$

После подстановки в (8) полученных выражений для ускорений (6) и скорости (5), получим алгебраическую систему уравнений:

$$[A] \{w_{i+1}\} = \{R_{i+1}\} \quad (9)$$

где:

$$[A] = [K] + \frac{1}{\alpha \tau^2} [M]$$

$$\{R_{i+1}\} = \{P_{i+1}\} + [M] \left(\frac{1}{\alpha \tau^2} \{w_i\} + \frac{1}{\alpha \tau} \{\dot{w}_i\} + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \{\ddot{w}_i\} \right) + \{W_i\}, \quad (10)$$

где:

$$\{W_i\} = \int_0^t R_1(t-\tau)[K]\{w_i\}d\tau + E\gamma\{V_i\} - E\gamma \int_0^t R_2(t-\tau)d\tau \{V_i\} \quad (11)$$

Для решения полученной системы уравнений необходимо задание в начальный момент значений перемещений $\{w_0\}$, скорости $\{\dot{w}_0\}$ и ускорений $\{\ddot{w}_0\}$. Обычно принимают $\{\ddot{w}_0\} = 0$.

Метод Ньюмарка безусловно устойчив, если $\beta \geq 0.5$, $\alpha \geq 0.25(\beta + 0.5)^2$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В такой общей постановке с помощью разработанной методики и созданной программы для ЭВМ исследованы задачи в линейной, нелинейной и вязкоупругой постановках. Параметры вязкости R_1 принимаются $R_2=2R_1$; $\gamma = 120000$.

1. Резонансный режим и синусоидально-затухающее воздействие.

Рассматриваются вынужденные колебания нелинейно-вязко-упругой высотной трубы при кинематическом возбуждении основания по гармоническому закону. Полученные горизонтальные перемещения для точки трубы $z=325\text{м}$ показаны на рис.2. Этим перемещениям соответствует линия со звездочками. Здесь же для сравнения сплошной линией представлено решение для той же точки линейно упругого сооружения.

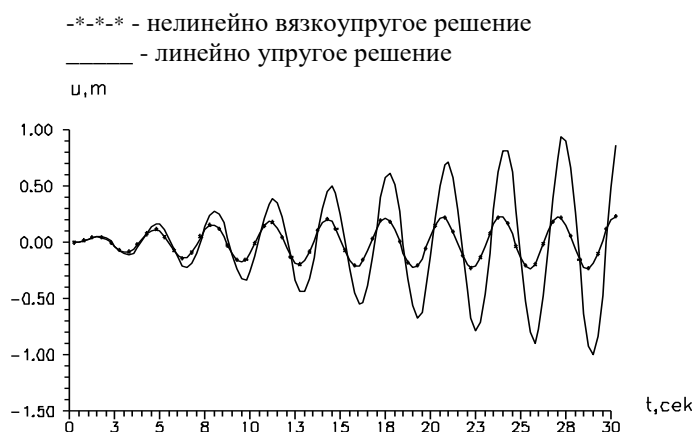


Рис.2. Вынужденные колебания точки $z=325\text{м}$ трубы с учетом нелинейно вязкоупругих свойств материала при воздействии $\ddot{w}_0 = 0.1A\sin(1.68t)$

Fig.2. Forced vibrations of a point $z=325\text{m}$ pipes, taking into account the nonlinear viscoelastic properties of the material when exposed to $\ddot{w}_0 = 0.1A\sin(1.68t)$

Анализ представленных результатов показывает, что общий случай, когда учитываются нелинейные и вязкие свойства материала приводит к наибольшему уменьшению амплитуд перемещений точек высотного сооружения по сравнению со всеми предыдущими вариантами.

2. Синусоидально-затухающее воздействие.

Аналогичные результаты получаются при синусоидально-затухающем кинематическом воздействии в основании трубы. Эти результаты представлены на рис.3.

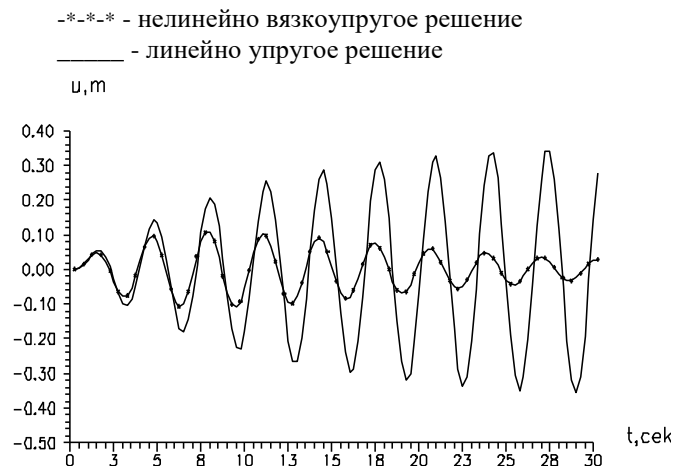


Рис.3. Вынужденные колебания точки $z=325\text{м}$ трубы с учетом нелинейно вязкоупругих свойств материала при воздействии $\ddot{w}_0=0.1A\sin(1.68t)\exp(-0,1t)$

Fig.3. Forced vibrations of a point $z=325\text{m}$ pipes, taking into account the nonlinear viscoelastic properties of the material when exposed to $\ddot{w}_0=0.1A\sin(1.68t)$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследование динамического поведения высотного сооружения при учете различных по природе нелинейных и диссипативных свойств материала показывает, что совместный учет всех этих свойств приближает получаемую картину к наблюдаемой в действительности. То есть амплитуда колебаний сооружения не бесконечно растет, а с течением времени постепенно снижается, причем максимально возможный учет нелинейных и диссипативных свойств приводит к скорейшему затуханию колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Динамический расчет зданий и сооружений. Справочник проектировщика / Под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. М.: Стройиздат, 1984. 303 с.
2. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. Справочник проектировщика / Под ред. Б.Г.Коренева, И.М.Рабиновича. М.: Стройиздат, 1981. 215 с.
3. Динамический расчет специальных инженерных сооружений и конструкций. Справочник проектировщика / Под ред. Б.Г.Коренева, А.Ф.Смирнова. М.: Стройиздат, 1986. 462 с.
4. Мирсаидов М., Хамраев П., Шаалимов А. Экспериментальное и теоретическое определение динамических характеристик дымовой трубы // Строительство и архитектура. Эксп.инф.серия 15. М., 1985. с.17-18.
5. Мирсаидов М., Хамраев П. Экспериментальные исследования колебаний высокой дымовой трубы // Тем. сб. научн. трудов ТашПИ. Экспериментально-теоретические исследования инженерных сооружений. Ташкент, 1985. с.8-15.
6. Mirsaidov M. M., Abdikarimov R.A., Khodzhaev D.A. Dynamics of a Viscoelastic Plate Carrying Concentrated Mass with Account of Physical Nonlinearity of Material: Part 1. Mathematical Model, Solution Method and Computational Algorithm. PNRPU Mechanics Bulletin. 2019. No 2. Pp.143-153. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.2.11
7. Abdikarimov R., Khodzhaev D., Vatin N. To Calculation of Rectangular Plates on Periodic Oscillations. MATEC Web of Conferences. Volume 245. 2018. No 010032018 International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering. EECCE 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201824501003
8. Khodzhaev D., Abdikarimov R., Vatin N. Nonlinear oscillations of a viscoelastic cylindrical panel with concentrated masses. MATEC Web of Conferences. Volume 245. 2018. No01001. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering. EECCE 2018. DOI:10.1051/mateconf/201824501001
9. Newmark N.M. Inelastic design of nuclear reactor structures and its implications on design of critical equipment. Seism response anal of nucl power plant syst. Volume k(a), 10p San Francisco, CA, USA; 1977.
10. Sharpe R.L., Newmark N.M. Extending seismic design provisions for buildings to the design of offshore structures. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference. Houston, United States. No 140861.1977. Pp. 177-184.
11. De Domenico D., Ricciardi G. Earthquake-resilient design of base isolated buildings with TMD at basement: Application to a case study. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Volume 113, 2018. Pp. 503-521. DOI:10.1016/j.soildyn.2018.06.022
12. Li J.-Y., Zhu S., Shen J. Enhance the damping density of eddy current and electromagnetic dampers. Smart Structures and Systems. Volume 24, Issue 1. 2019. Pp. 15-26. DOI: 10.12989/sss.2019.24.1.015

13. Zhao Z., Zhang R., Jiang Y., Pan C. A tuned liquid inerter system for vibration control. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 164, 2019. No 105171. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2019.105171
14. Gu M., Cao H.L., Quan Y. Experimental study of aerodynamic damping of typical tall buildings *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. No 731572 DOI: 10.1155/2013/731572
15. Gu M., Cao H.L., Quan Y. Experimental study of across-wind aerodynamic damping of super high-rise buildings with aerodynamically modified square cross-sections. *Structural Design of Tall and Special Buildings* Volume 23, Issue 16, 1. 2014. Pp. 1225-1245 DOI:10.1002/tal.1137
16. Mavlanov T, Khudainazarov Sh., Khazratkulov I. Natural Vibrations of Structurally Inhomogeneous Multi-Connected Shell Structures with Viscoelastic Elements. *Journal of Physics: Conference Series* Volume 1425, Issue 1. 2020. No012017 DOI:10.1088/1742-6596/1425/1/012017
17. Mavlanov T and Khudainazarov Sh. Calculation of structural-inhomogeneous multiply connected shell structures with viscoelastic elements *E3S Web of Conferences*. Vol. 97. No 040542. 2019. DOI:10.1051/e3sconf/2019970405418
18. Сергеевцев Е.Ю., Зубков Д.А., Румянцев А.А. Изучение динамических характеристик высотного здания. *Вестник МГСУ*. 2011. №4. С.266-272.

ОБ АВТОРАХ

Шерзод Ачилович Худайназаров – доцент кафедры «Теоретической и строительной механики», Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства». 100000, Узбекистан, г. Ташкент, ул. К.Ниязова, д. 39. E-mail: scherzodshox77@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Sherzod Achilovich Khudainazarov – Associate Professor of the Department of Theoretical and Structural Mechanics, «Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers» National Research University. 100000, Uzbekistan, Tashkent, K.Niyazi st., 39. E-mail: scherzodshox77@mail.ru